

沙棘果黄酮和多糖的降解条件优化及动力学分析

加列西·马那甫, 王建华, 阿依孜克热·依斯马衣, 阿布力克木·吾布力达

(新疆农业大学化学工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 本研究以沙棘果为原料, 在单因素试验的基础上, 选择储存时间、超声时间和提取温度 3 因素为自变量, 黄酮和多糖降解率为响应值, 结合响应面法对沙棘果黄酮和多糖降解率进行优化。最优降解条件为黄酮: 储存时间 10 d、超声时间 114 min、提取温度 73.62 °C; 多糖: 储存时间 10 d、超声时间 115.20 min、提取温度 71.30 °C; 相应的黄酮和多糖的降解率分别为 70.11%、67.30%。研究了沙棘果黄酮和多糖的含量随各因素的变化规律和降解动力学, 并以此为基础建立储存期预测模型。试验结果表明, 储存时间在 5~10 d, 黄酮和多糖的降解符合一级动力学模型, 其降解活化能 E_a 为 63.53 和 68.40 kJ/mol。本研究结果可为沙棘果储存期的选择提供理论依据。

关键词: 沙棘果; 黄酮, 多糖; 响应面法; 降解; 动力学模型

文章编号: 1673-9078(2021)03-124-131

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.3.0785

Optimization and Kinetics of the Degradation of Flavonoids and Polysaccharides in Seabuckthorn Fruit

Jialiexi·Manafu, WANG Jian-hua, Ayizukeri·Esimayi, Abulikemu·Wubulida

(College of Chemical Engineering Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In this study, we chose seabuckthorn fruit as raw material. Based on the single factor experiment, three factors including storage time, ultrasonic time and extraction temperature were selected as independent variables, and the degradation rate of flavonoids and polysaccharides was selected as response value. Then, the degradation rate of flavonoids and polysaccharides in seabuckthorn fruit was optimized by response surface method. We found that the optimal degradation conditions of flavonoids were: storage time of 10 days, ultrasonic time of 114 min, and extraction temperature of 73.62 °C; for polysaccharide: storage time of 10 days, ultrasonic time of 115.2 min, and extraction temperature of 71.30 °C. The degradation rates of flavonoids and polysaccharides were 70.11% and 67.30%, respectively. The variation law and degradation kinetics of flavonoids and polysaccharides in seabuckthorn fruit with various factors were studied, and a storage period prediction model was established. The results showed that in 5~10 days of the storage time, the degradation of flavonoids and polysaccharides fits with the first order kinetics model, and the degradation activation energy E_a is 63.53 and 68.40 kJ/mol. This study could provide a theoretical basis for the selection of storage period of seabuckthorn fruit.

Key words: seabuckthorn fruit; flavonoids; polysaccharides; response surface method; degradation; dynamic model

引文格式:

加列西·马那甫, 王建华, 阿依孜克热·依斯马衣, 等. 沙棘果黄酮和多糖的降解条件优化及动力学分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(3): 124-131

Jialiexi·Manafu, WANG Jian-hua, Ayizukeri·Esimayi, et al. Optimization and kinetics of the degradation of flavonoids and polysaccharides in seabuckthorn fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(3): 124-131

沙棘果可以作食物和药物又名醋柳、酸刺等, 是我国重要的经济植物。据研究发现沙棘含有百种

收稿日期: 2020-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21965036)

作者简介: 加列西·马那甫 (1964-), 男, 副教授, 研究方向: 实用药物分析

通讯作者: 阿布力克木·吾布力达 (1985-), 男, 博士, 研究方向: 有机发光材料

以上的化合物, 有“维生素宝库”、“神奇果树”等美称。部分活性物质在医药、保健、食品等领域具有广阔的发展前景^[1-5]。黄酮和多糖是沙棘果中营养价值极高的主要活性成分, 作为水果或保健品, 符合和满足人们日常生活的需求。沙棘果中黄酮和多糖具有抗肿瘤、增强机体免疫、抗衰老、抗病毒、降血糖、抗心肌缺血、降血脂等作用; 对病毒性心肌炎、大肠杆菌、枯草杆菌等具有抑制作用。同时改

善免疫系统、抗氧化方面发挥重要作用^[6-12]。

沙棘果在贮藏、运销过程中营养成分发生一系列变化、从而导致商品价值的降低、尤其是在贮藏期间黄酮和多糖的损失比较严重、这主要与温度、时间、氧气等因素有关。我国的沙棘果活性成分的降解研究目前仍然处于初级阶段。本研究在单因素试验的基础上、采用响应面法研究储存时间、超声时间、提取温度三因素对沙棘果中黄酮和多糖降解率的影响、优化降解条件建立降解工艺参数与降解率之间的数学模型、确定最优降解条件、取得沙棘果黄酮和多糖的最佳降解率,为研究沙棘果储存期的选择提供理论依据^[13-22]。由于沙棘果中黄酮和多糖在储存过程中易降解、因此深入研究沙棘果黄酮和多糖的降解规律及相关动力的变化机制对控制有效成分的损失具有重要意义。目前,中草药、水果等的降解动力学研究主要集中在对有效成分含量变化的分析上、对沙棘果黄酮和多糖的降解规律的研究未见报道。本文研究不同储存时间对沙棘果黄酮和多糖含量变化的影响,建立黄酮和多糖降解动力学模型、效控制黄酮和多糖的降解过程、为延长其贮藏期提供理论依据^[23-25]。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

TU-1810 型 紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;恒温水浴槽,上海苏进仪器设备厂;电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司。

草酸、抗坏血酸、盐酸、乙酸钠、浓硫酸、乙醇、亚硝酸钠、芦丁、硝酸铝、氢氧化钠、苯酚均为分析纯。

1.2 实验方法

1.2.1 沙棘果中黄酮的测定

精称芦丁对照品 20 mg,置 100.0 mL 量瓶中,加 85%乙醇溶解,定容,摇匀。精取 0、0.10、0.50、1.00、1.50、2.00、2.50、3.00 mL 于 25.00 mL 量瓶中,加 5%亚硝酸钠溶液 0.40 mL,放置 6 min,加 10%硝酸铝溶液 0.40 mL,放置 6 min,再加 4%氢氧化钠溶液 4 mL,加水至刻度,摇匀,放置 15 min,在 510 nm 波长处测定吸光度,计算得回归方程:

$$y = 0.01266x - 0.04523, r = 0.9945。$$

称取沙棘果粉末 2 g,置于 100.0 mL 的容量瓶中,加入 50%乙醇 80 mL,80 °C 水浴回流提取一定

时间。抽滤,离心后合并清液,浓缩。精取适量提取液,按以上方法在 510 nm 波长处测定吸光度,计算降解率。

1.2.2 沙棘果中多糖的测定

精称葡萄糖对照品 25 mg,置 100.0 mL 量瓶中,加水溶解并稀释至刻度,摇匀。精取 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50、1.75、2.00 mL 于 10.00 mL 量瓶中,加水稀释至刻度,分别取 1.0 mL 于 10 mL 量瓶中,加 5%苯酚溶液 1.0 mL,摇匀,加硫酸 5 mL,立即摇匀,沸水浴加热 10 min,冷却至室温,以水同法作空白参比,在 485 nm 波长处测定吸光度,计算得回归方程: $y = 0.11744x + 0.052, r = 0.9965$ 。

将提尽黄酮后的残渣置于 200 mL 锥形瓶中,加入 3 倍体积的 95%乙醇沉淀,4 °C 冷藏过夜,高速冷冻离心,沉淀物用无水乙醇洗涤数次后,真空干燥得粗多糖。精称粗多糖适量,置于 50.00 mL 量瓶中,加水溶解并稀释至刻度。精取多糖溶液 1.0 mL,按以上方法在 485 nm 波长处测定吸光度,计算降解率。

$$y = (A_1 - A_0 / A - A_0) \times 100\%$$

式中: y: 降解率; A_1 : 待测液降解后的黄酮或多糖含量; A_0 : 待测液初始黄酮或多糖的含量; A: 总的黄酮或多糖含量。

1.2.3 单因素试验

以沙棘果为原料、研究储存时间、超声时间、提取温度对沙棘果黄酮和多糖降解率的影响。

1.2.4 响应面法优化沙棘果黄酮和多糖降解工艺

综合单因素试验结果、根据 Box-Behnken 实验设计原理、采用响应面法、在三因素三水平上对沙棘果中黄酮和多糖的降解率进行优化研究。

1.2.5 沙棘果黄酮和多糖降解动力学研究

取不同储存时间的沙棘果样品适量,配成溶液,取 10 mL、按“1.2.1”和“1.2.2”项进行黄酮和多糖含量的测定。

1.2.6 降解动力学方程

食品的营养成分在储存加工过程中都会受到各种因素的影响而降解、降解反应的动力学模型基本上符合零级或一级动力学反应模型、可用以下模型描述。式(1)为零级动力学反应模型、式(2)为一级反应动力学模型。

$$f(c) = f(c_0) - kt \quad (1)$$

$$f(c) = f(c_0) \exp(-kt) \quad (2)$$

2 结果与分析

2.1 单因素试验

实验分别考察了储存时间、超声时间、提取温度等因素对沙棘果黄酮、多糖降解率的影响。实验结果表明,储存时间、超声时间、提取温度对沙棘果黄酮、多糖的降解率有较大的影响。初步选定沙棘果黄酮、多糖的降解条件为储存时间 10 d、超声时间 110 min、提取温度 80 ℃。

2.2 响应面法优化沙棘果黄酮、多糖降解工艺

2.2.1 试验安排与结果

表1 Box-Behnken试验设计因素与水平的编码

Table 1 Box-behnken experimental design factors and horizontal

因素	水平		
	-1	0	1
储存时间A/h	8	10	12
超声时间B/min	90	110	130
温度C/℃	60	70	80

根据单因素试验结果、以储存时间(A)、超声时间(B)、提取温度(C)为自变量、黄酮、多糖降解率为响应值、设计3因素3水平的响应面分析试验。因

素水平编码见表1; 分析试验结果见表2。

表2 响应面实验设计及数据处理

Table 2 Experimental design and data processing of response

surface					
编号	A/h	B/min	C/℃	黄酮降解率/%	多糖降解率/%
1	8	110	80	49.30	38.40
2	10	90	80	53.20	47.70
3	8	90	70	61.20	41.20
4	8	130	70	55.30	51.30
5	10	110	70	72.90	69.30
6	10	130	80	48.50	39.50
7	10	110	70	71.80	68.60
8	10	110	70	70.90	67.90
9	8	110	60	64.90	44.80
10	10	110	70	69.90	68.90
11	10	130	60	55.80	51.20
12	12	110	60	49.30	48.30
13	10	90	60	51.60	49.70
14	12	130	70	66.30	46.30
15	10	110	70	72.20	69.10
16	12	80	70	59.50	53.30
17	12	110	80	60.30	51.20

表3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of regression model variance

项目	黄酮						多糖					
	自由度 DF	平方和	均和	F 值	p 值	显著性 SI	自由度 DF	平方和	均和	F 值	p 值	显著性 SI
模型	1234.52	9	137.18	28.24	0.0001	**	1607.89	9	178.65	16.22	0.0007	**
A	1.71	1	1.71	0.35	0.5715		17.11	1	17.11	1.55	0.2527	
B	0.020	1	0.020	0.00411	0.9506		5.45	1	5.45	0.49	0.5047	
C	10.81	1	10.81	2.23	0.1793		8.61	1	8.61	0.78	0.4060	
AB	40.32	1	40.32	8.30	0.0236	*	74.82	1	74.82	6.79	0.00351	**
AC	190.44	1	190.44	39.21	0.0004	***	1.44	1	1.44	0.13	0.7284	
BC	19.80	1	19.8	4.08	0.0832		80.10	1	1.44	7.27	0.0308	*
A ²	59.84	1	59.84	12.32	0.0099	**	533.37	1	533.37	48.42	0.0002	***
B ²	217.97	1	217.97	44.88	0.0003	***	374.42	1	374.42	33.99	0.0006	***
C ²	613.41	1	613.41	126.29	0.0001	***	364.56	1	364.56	33.09	0.0007	***
残差	34.00	7	4.86				77.11	7	11.02			
失拟项	28.55	3	9.52	6.98	0.2385	*	75.92	3	25.31	33.09	0.400	
绝对误差	5.45	4	1.36				1.19	4	0.30			
总误差	1268.62	16					1685.0	16				
R (黄酮) =97.52							R (多糖) =96.30					

注: 统计学根据显著性检验方法所得到的P值, 一般以 * $p < 0.05$ 为显著, ** $p < 0.01$ 为极显著, *** $p < 0.001$ 差异极显著。

2.2.2 模型方程的建立与方差分析

应用 SAS 软件对表中的数据进行二次多元回归拟合, 得到储存时间、超声时间、提取温度与沙棘果

黄酮、多糖降解率之间的二次多项回归方程:

$$Y(\text{黄酮}) = 71.54 + 0.4625A + 0.05B - 1.1625C + 3.175AB + 6.9AC + 2.225BC - 3.77A^2 - 7.195B^2 - 12.07C^2$$

$$Y(\text{多糖}) = 68.76 + 1.4625A - 0.825B - 1.0375C - 4.325AB - 0.6AC - 4.475BC - 11.255A^2 - 9.43B^2 + 9.305C^2$$

由表 3 分析结果可看出, 黄酮模型 p 为 0.001 ($p < 0.01$), 极显著。失拟差 p 为 0.2385 ($p < 0.05$) 不显著, 说明数据中没有异常点。由黄酮模型系数显著性检验结果可知, 模型的一次项对降解率不显著; 二次项对降解率极显著; 交互项 AB 对降解率显著、AC 对降解率极显著、BC 对降解率不显著。由此可知, 在本实验设计范围内, 储存时间、超声时间、提取温度对沙棘果黄酮降解率的线性效应和曲面效应都显著。多糖模型 p 为 0.007 ($p < 0.01$), 模型极显著; 失拟差 p 为 0.4 ($p > 0.05$) 不显著, 说明数据中没有异常点。由多糖模型系数显著性检验结果可知, 模型的一次项对降解率不显著; 二次项对降解率极显著; 交互项 AB、BC 对降解率显著、AC 对降解率不显著。由

此可知, 在本实验设计范围内, 储存时间、超声时间、提取温度对沙棘果多糖降解率的线性效应和曲面效应都显著。

2.2.3 响应曲面分析

应用 Design-Expert 8.0.6 软件进行进一步优化; 根据回归模型作出相应的响应曲面图和等高线图、考察拟合响应曲面的形状、分析各因素对沙棘果黄酮、多糖降解率的影响, 结果见图 1 黄酮曲线图、图 2 多糖的曲线图。

等高线的形状反映了交互效应的强弱, 椭圆形表示两因素交互影响显著、圆形则与之相反。由图 1~2 可知, 黄酮的降解中储存时间、超声时间、提取温度之间的交互作用较小。在多糖的降解中储存时间、超声时间、提取温度与储存时间之间有一定的交互作用, 超声时间与提取温度之间的交互作用较小。

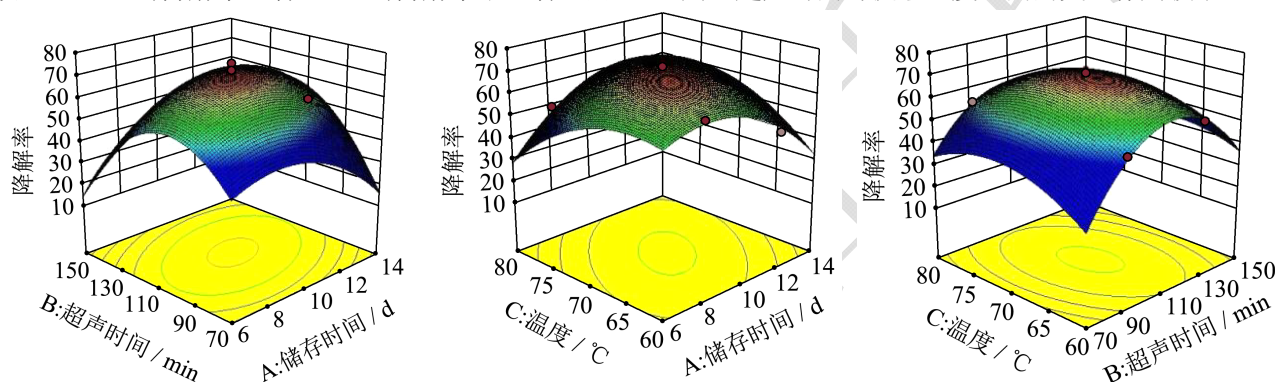


图1 各因素交互作用对沙棘果黄酮降解率影响的响应面和等高线图

Fig.1 Response surface and contour map of the interaction of various factors on the degradation rate of seabuckthorn fruit flavonoids

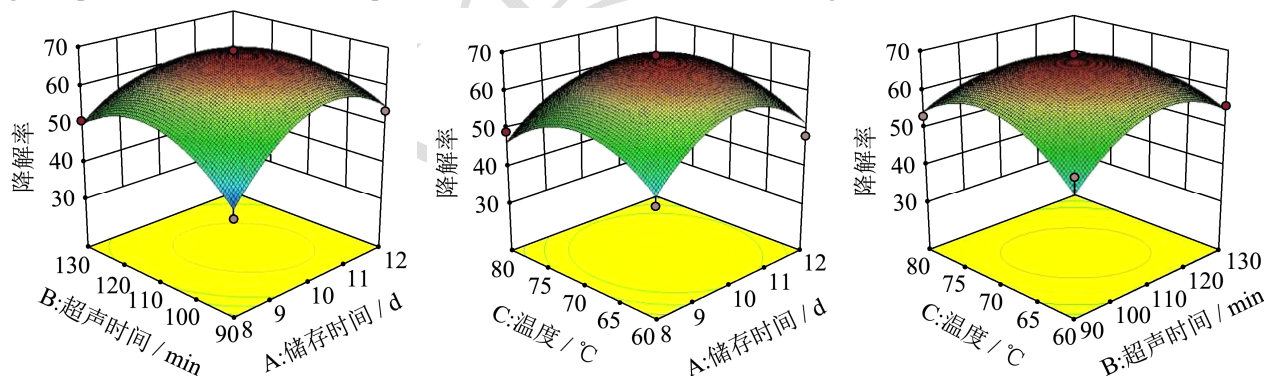


图2 各因素交互作用对沙棘果多糖降解率影响的响应面和等高线图

Fig.2 Response surface and contour map of the interaction of various factors on the degradation rate of seabuckthorn fructose

2.3 最佳降解条件的确定

通过响应面法得到的最佳降解条件为黄酮: 储存时间为 10 d, 超声时间为 114 min, 提取温度为 73.60 °C、此时沙棘果黄酮的降解率为 70.11%; 多糖: 储存时间为 10 h, 超声时间为 115.50 min, 提取温度为 74.51 °C, 此时沙棘果多糖的降解率为 68.20%。该回归方程与实际情况很符合, 说明响应

面法优化沙棘果黄酮和多糖的降解条件是可行的。

2.4 沙棘果黄酮、多糖降解动力学解析

2.4.1 反应级数的确定

黄酮、多糖的降解符合零级或一级反应, 根据实验数据由式 (1) 和式 (2) 计算沙棘果热处理过程中黄酮、多糖在相应反应级数下的降解速率常数 k , 并进行线性回归分析, 得相关系数, 结果如表 4

所示。

在一定储存时间,通过比较反应级数的反应速率常数 k 来推断降解反应的快慢,比较零级和一级反应的线性回归系数 R^2 来推断反应级数,线性回归系数 R^2 较高说明反应符合此级数。由表 4 可知,不论是零级还是一级反应,沙棘果在不同储存时间下黄酮、多糖的降解速率常数 k 随着储存时间的延长,其对应的降解速率常数 k 随之增大,说明沙棘果黄酮、多糖的降解是一级反应;储存时间的延长将促进反应的进

行,当储存时间达到 5 d 时,黄酮、多糖的降解速率常数 k 明显增加,大小为多糖>黄酮,说明储存时间短可以抑制沙棘果黄酮、多糖的破坏,但储存时间越长对黄酮、多糖的降解影响比短储存时间对沙棘果黄酮、多糖的降解影响大。由表 4 可知,在储存时间 0 d 时,零级反应和一级反应的线性回归系数 R^2 差别不显著,随着储存时间延长,一级反应的回归系数 R^2 要高于零级反应,说明不论在何种条件,沙棘果黄酮、多糖在储存过程中的降解过程均符合一级动力学反应。

表4 零级反应和一级反应的线性回归系数 R^2

Table 4 The linear regression coefficient R^2 for the zero order reaction and the first order reaction

储存时间/d	黄酮				多糖			
	零级反应速率常数 (k)	回归系数	一级反应速率常数 (K)	回归系数	零级反应速率常数 (k)	回归系数	一级反应速率常数 (K)	回归系数
0	0.0121	0.941	0.0113	0.914	0.0512	0.824	0.0418	0.904
2	0.0159	0.963	0.0275	0.933	0.0585	0.855	0.0461	0.933
4	0.0231	0.957	0.0351	0.951	0.0613	0.919	0.0598	0.957
6	0.0235	0.968	0.0579	0.954	0.0664	0.930	0.0659	0.964
8	0.0752	0.971	0.0632	0.960	0.0711	0.959	0.0610	0.977
10	0.0823	0.978	0.0709	0.969	0.0748	0.966	0.0794	0.985
12	0.0878	0.981	0.0739	0.970	0.0793	0.975	0.0779	0.998

表5 不同储存时间下黄酮、多糖降解半衰期、活化能和指前因子

Table 5 Flavonoid, polysaccharide degradation half-time, activation energy and predactyl factor with different storage time

储存时间/d	黄酮			多糖		
	半衰期 ($t_{1/2}$)	活化能 (E_0)	指前因子 (A)	半衰期 ($t_{1/2}$)	活化能 (E_0)	指前因子 (A)
0	521			645		
2	489			513		
4	381			402		
6	302	63.53	8.76×10^6	357	68.4	9.36×10^6
8	285			257		
10	198			113		
12	85			69		

2.4.2 降解动力学参数的确定

将Arrhenius经验公式左右两边同时取对数可得

$$\ln k = \ln A - E_a / RT \quad (3)$$

$$k = A \exp(-E_a / RT) \quad (4)$$

对黄酮、多糖一级反应速率常数的对数 $\ln k$ 与储存时间的倒数 $1/T$ 作线性回归,由式(4)可知,由直线的斜率和截距分别求得反应的活化能 E_a 和指前因子 A ,具体参数数值如表5所示。

由Arrhenius方程得到的降解活化能 E_a 可以认为是黄酮、多糖降解时到达降解能峰所需要吸收的热量,通常认为化学反应的活化能 E_0 为40~400 kJ/mol,活化能 E_0 越小,反应越易进行。当 $E_0 < 42$ kJ/mol,反应速率非常大, $E_0 > 400$ kJ/mol,反应速率非常小。从表5

可知,在常规储存状态下沙棘果黄酮、多糖的降解活化能 E_a 值黄酮<多糖,说明储存时间可以对黄酮、多糖的降解起到保护作用,但储存时间对多糖的影响比黄酮的影响大一些。

2.4.3 动力学模型的建立及验证

在不同储存时间沙棘果黄酮、多糖质量浓度的变化,将式(2)两边取对数后和式(4)可得到在不同储存时间黄酮、多糖降解一级动力学模型,即:

$$t = \ln f(c_0) - \ln f(c) / A \exp(-E_0 / RT) \quad (5)$$

活化能 E_a 、指前因子 A 和 $R=8.314$ J/(mol·K)代入上式可得不同储存条件下沙棘果黄酮、多糖降解一级动力学模型:

$$t = \ln f(c_0) - \ln f(c) / 7.80 \times 10^6 \times \exp(-9236.7 / T) \quad (6)$$

表 6 沙棘果在不同储存条件下黄酮、多糖降解动力学模型验证

Table 6 Validation of degradation-kinetic models of flavonoid and polysaccharide of seabuckthorn fruit under different storage conditions

储存时间/d	黄酮/%			多糖/%		
	预测值	实测值	标准偏差	预测值	实测值	标准偏差
0	52.13	52.41		64.52	63.21	
2	51.56	51.09		62.87	61.94	
4	49.37	49.19		60.45	60.04	
6	48.71	48.65	1.93	58.39	58.12	4.70
8	48.99	48.82		55.47	54.79	
10	47.76	47.59		53.61	53.23	
12	47.01	46.86		50.72	50.57	

式(5)为沙棘果在储存时间为0 d的降解动力学模型,式(6)为沙棘果在储存时间5 d时的降解动力学模型,通过上式计算的沙棘果黄酮、多糖的初始量和残留量估算贮藏期。

对表6中的预测值和实测值进行相关性分析,储存时间为0 d预测值和实测值的决定系数为0.85,储存时间为5 d预测值和实测值的决定系数为3.61,储存时间为10 d的预测值和实测值的决定系数为0.8,表明所建立的储存时间降解一级动力学模型有效,为预测沙棘果在不同贮藏条件黄酮、多糖的降解提供理论指导。

3 结论

3.1 通过单因素实验,采用响应面法对沙棘果黄酮和多糖的降解率进行优化,建立降解回归模型,最优降解条件为黄酮:储存时间 10 d、超声时间 114.50 min、提取温度 73.60 ℃;多糖:储存时间 10 d、超声时间 115.60 min、提取温度 74.51 ℃。在此条件下,黄酮、多糖的降解率分别为 70.11%, 67.30%;与模型预测结果相近,拟合性良好,进一步验证了模型的可靠性。

3.2 为揭示环境对沙棘果有效成分的影响规律,研究了不同储存时间对沙棘果黄酮、多糖含量的稳定性和有效期;并进行降解动力学研究。沙棘果黄酮、多糖在不同储存时间的降解均符合一级反应动力学。通过对黄酮、多糖降解动力学的研究,为食品、中药类的储藏、加工及开发应用奠定理论基础。

参考文献

- [1] 董诗婷,陈云,高群玉.沙棘果生物活性成分及其功能的研究进展[J].中国酿造,2020,39(2):26-30
DONG Shi-ting, CHEN Yun, GAO Qun-yu. Research progress on bioactive compounds and function of sea buckthorn berry [J]. China Brewing, 2020, 39(2): 26-30

- [2] 孙伟鹏,马娜,党艳艳.沙棘果渣中多种有效成分的提取及其抗氧化性能研究[J].食品工业,2018,39(6):151-155
SUN Wei-peng, MA Na, DANG Yan-yan. Extraction of multiple effective components and oxidation resistance effects from sea buckthorn marc [J]. The Food Industry, 2018, 39(6): 151-155
- [3] 彭游,汤明,胡小铭,等.沙棘黄酮提取进展[J].天然产物研究与开发,2012,24:562-567
PENG You, TANG Ming, HU Xiao-ming, et al. Advances in extraction of flavonoids in seabuckthorn [J]. Natural Product Research and Development, 2012, 24: 562-567
- [4] 焦岩,常影,刘井权.沙棘黄酮提取与分离技术研究综述[J].食品工业,2012,33(8):115-118
JIAO Yan, CHANG Ying, LIU Jing-quan. The extraction and separation techniques summary of seabuckthorn flavone [J]. The Food Industry, 2012, 33(8): 115-118
- [5] 姚娜娜,车凤斌,李永海,等.沙棘的营养价值及综合开发利用概述[J].保鲜与加工,2020,20(2):226-232
YAO Na-na, CHE Feng-bin, LI Yong-hai, et al. Nutritional value and comprehensive development and utilization of *Hippophae rhamnoides* [J]. Storage and Process, 2020, 20(2): 226-232
- [6] 丁丽娜,邱亦亦,束彤,等.超高效液相色谱-质谱联用技术解析沙棘果超临界 CO₂ 萃取物中黄酮类天然产物结构[J].食品科学,2019,40(18):273-279
DING Li-na, QIU Yi-yi, SHU Tong, et al. Determination of flavonoids in the supercritical CO₂ extract of sea buckthorn fruit by using ultra-high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Food Science, 2019, 40(18): 273-279
- [7] 孙琛,宁静,宋忠兴,等.星点设计-响应曲面法优化沙棘果渣总黄酮的提取工艺[J].中国现代中药,2018,20(1):74-78

- SUN Chen, NING Jing, SONG Zhong-xing, et al. Application of CCD-RSM for optimization of total flavonoids extraction in *Hippophae rhamnoides* pomace [J]. Mod Chin Med, 2018, 20(1): 74-78
- [8] 帕塔尔·尼牙孜,邱远金,王婷媛,等.正交实验优化新疆沙棘果渣总黄酮的提取工艺[J].西北药学杂志,2016,31(2): 119-121
- Pataer·Niyazi, QIU Yuan-jin, WANG Ting-yuan, et al. Optimization of extraction procedure of flavonoids from Xinjiang seabuck thorn residues using orthogonal experiment [J]. Northwest Pharmaceutical Journal, 2016, 31(2): 119-121
- [9] 白生文,汤超,田京,等.沙棘果渣总黄酮提取工艺及抗氧化活性分析[J].食品科学,2015,36(10):59-63
- BAI Sheng-wen, TANG Chao, TIAN Jing, et al. Extraction and antioxidant activity of total flavonoids from sea buckthorn pomace [J]. Food Science, 2015, 36(10): 59-63
- [10] 加列西·马那甫,吐力吾汗·阿米汗,景伟文.甘草籽黄酮、多糖复合提取工艺参数优化及抗氧化性研究[J].药物分析杂志,2014,34(4):686-692
- Jialiexi·Manafu, Tuliwuhan·Amihan, JING Wei-wen. Optimization of process parameters for flavonoid and polysaccharide complex extraction from licorice seeds and its antioxidant activity study [J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2014, 34(4): 686-692
- [11] 杨宏志,王洪江,张春芝,等.热水提取沙棘多糖工艺研究[J].农产品加工,2018,4:22-25
- YANG Hong-zhi, WANG Hong-jiang, ZHANG Chun-zhi, et al. Study on extraction technology of polysaccharides from sea-buckthorn by hot-water processing [J]. Farm Products Processing, 2018, 4: 22-25
- [12] 吕志琴,童军茂,陈国刚,等.沙棘多糖提取纯化的工艺研究[J].农产品加工,2013,3(311):41-43
- LYU Zhi-qin, TONG Jun-mao, CHEN Guo-gang, et al. Extraction of polysaccharide from *Hippophae rhamnoides* L. by microwave synergistically assisted technique [J]. Farm Products Processing, 2013, 3(311): 41-43
- [13] 彭明.星点设计-响应面法优化沙棘总黄酮提取工艺[J].中国药师,2020,23(7):1322-1325
- PENG Ming. Extraction optimization of total flavonoids in *Hippophae rhamnoides* L. by central composite design and response surface method [J]. China Pharmacist, 2020, 23(7): 1322-1325
- [14] 马玉荣,黄惠华.热处理对豆浆中大豆异黄酮含量及降解动力学的影响[J].现代食品科技,2015,31(1):26-30
- MA Yu-rong, HUANG Hui-hua. Effect of heat treatment on the content and thermal degradation kinetics of isoflavones in soymilk [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(1): 26-30
- [15] 何凤林,刘晓娟,赵力超,等.强化抗氧化性番薯干中茶多酚和葛根黄酮的热降解动力学研究[J].现代食品科技,2015,31(1):26-30
- HE Feng-lin, LIU Xiao-juan, ZHAO Li-chao, et al. Thermal degradation kinetics of tea polyphenols and pueraria flavonoids in sweet potato slices of antioxidant-fortified during storage [J]. Food Science and Technology, 2015, 31(1): 26-30
- [16] 李笑梅,安静.大豆异黄酮降解液中雌马酚纯化工艺[J].食品科学,2010,31(14):128-131
- LI Xiao-mei, AN Jing. Purification of equol from degradation products of soybean isoflavones resulting from *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *Bulgaricus* fermentation [J]. Food Science, 2010, 31(14): 128-131
- [17] 黄惠华,郭乾初,梁汉华,等.豆浆热处理过程中3种大豆异黄酮苷原的热降解比较[J].食品科学,2006,27(9):132-135
- HUANG Hui-hua, GUO Qian-chu, LIANG Han-hua, et al. Comparison study on heat-induced degradation of aglycones of soy isoflavones in soymilk [J]. Food Science, 2006, 27(9): 132-135
- [18] 王鑫纯,徐伟,蒋建新,等.野皂荚多糖氧化降解产物的体外代谢过程研究[J].林产化学与工业,2020,40(3):99-105
- WANG Xin-chun, XU Wei, JIANG Jian-xin, et al. *In vitro* metabolism process of oxidative degradation products from *Gleditsia microphylla* galactomannan [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2020, 40(3): 99-105
- [19] 陈鹏,颜军,梁立,等.银耳多糖的降解、磷酸酯化修饰及其抗氧化活性[J].食品工业科技,2019,40(9):34-37
- CHEN Peng, YAN Jun, LIANG Li, et al. Degradation, phosphate modification of *Tremella fuciformis* polysaccharide and its antioxidant activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(9): 34-37
- [20] 姜美云,唐硕,王婷,等.果胶多糖水热法降解及其产物体外抗氧化性评价[J].食品科学,2019,40(12):253-258
- JIANG Mei-yun, TANG Shuo, WANG Ting, et al. Degradation of pectic polysaccharide by hydrothermal treatment and antioxidant activity *in vitro* of the resulting products [J]. Food Science, 2019, 40(12): 253-258

- [21] 李健军, 许昭, 王仲孚, 等. 果胶多糖可控性降解及果胶寡糖的制备[J]. 西北药学杂志, 2017, 32(6): 726-730
LI Jian-jun, XU Zhao, WANG Zhong-fu, et al. Control edegradation of citruspectin polysaccharide and prepaation of oligoga-lacturonicacids from pecticacid [J]. Northwest Pharmaceutical Journa, 2017, 32(6): 726-730
- [22] 齐秀东, 魏建梅, 高海生, 等. 梨果实发育软化与果胶多糖降解特性的关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(15): 3028-3036
QI Xiu-dong, WEI Jian-mei, GAO Hai-sheng, et al. Pectin polysaccharide degradation in relation to the texture softening in pear fruit [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(15): 3028-3036
- [23] 任瑞, 马海乐, 朱春梅, 等. 香菇多糖微波降解反应动力学研究[J]. 化学工程, 2009, 37(4): 38-40
REN Rui, MA Hai-le, ZHU Chun-mei, et al. Kinetics of microwave degradation of lentina [J]. Chenical Engineering (China), 2009, 37(4): 38-40
- [24] 张元薇, 辛颖, 金郑阳, 等. 非恒温条件下樱桃维生素 C 变化动力学模型的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(13): 183-187
ZHANG Yuan-wei, XING Ying, JIN Zheng-yang, et al. A study of the degradation kinetic of vitamin C of sweet cherry under non-isothermal condition [J]. Food Research and Development, 2018, 39(13): 183-187
- [25] 傅鑫程, 肖佳颖, 徐海山, 等. 黄花菜热风干燥动力学与维生素 C 降解动力学研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(4): 14-18
FU Xin-cheng, XIAO Jia-ying, XU Hai-shan, et al. Drying and vitamin C degradation kinetics in daylily flower buds (*Hemerocallis citrina*) during hot air drying process [J]. Food Research and Development, 2019, 40(4): 14-18

(上接第 36 页)

- [17] Mukherjee N, Strosnider A, Vagher B, et al. BH3 mimetics induce apoptosis independent of DRP-1 in melanoma [J]. Cell Death Dis, 2018, 9(9): 907
- [18] Tian H, Zhang D F, Zhang B F, et al. Melanoma differentiation associated gene-7/interleukin-24 induces caspase-3 denitrosylation to facilitate the activation of cancer cell apoptosis [J]. J Interferon Cytokine Res, 2015, 35(3): 157-67
- [19] Hakkim F L, Bakshi H A, Khan S, et al. Frankincense essential oil suppresses melanoma cancer through down regulation of Bcl-2/Bax cascade signaling and ameliorates hepatotoxicity via phase I and II drug metabolizing enzymes [J]. Oncotarget, 2019, 10(37): 3472-3490
- [20] Muralidhar S, Folia A, Nsengimanana J, et al. Vitamin D-VDR signaling inhibits Wnt/ β -catenin-mediated melanoma progression and promotes antitumor immunity [J]. Cancer Res, 2019, 79(23): 5986-5998

(上接第 293 页)

- [25] Vega E, Barclay L, Gregoricus N, et al. Genotypic and epidemiologic trends of norovirus outbreaks in the United States, 2009 to 2013 [J]. Journal of Clinical Microbiology, 2014, 52: 147-155
- [26] Katayama K, Shirato-Horikoshi H, Kojima S, et al. Phylogenetic analysis of the complete genome of 18 Norwalk-like viruses [J]. Virology, 2002, 299: 225-239
- [27] Kageyama T, Kojima S, Shinohara M, et al. Broadly reactive and highly sensitive assay for Norwalk-like viruses based on real-time quantitative reverse transcription-PCR [J]. Journal of Clinical Microbiology, 2003, 41: 1548-1557
- [28] Vega E, Barclay L, Gregoricus N, et al. Novel surveillance network for Norovirus gastroenteritis outbreaks, United States [J]. Emerging Infectious Diseases, 2011, 17: 1389-1395
- [29] Zhan S, Li J M, Xu R H, et al. Armored long RNA controls of standards for branched DNA assay for detection of human immunodeficiency virus type 1[J]. Journal of Clinical Microbiology, 2009, 47(8): 2571-2576
- [30] Zhang L, Sun Y, Chang L, et al. A novel method to produce armored double-stranded DNA by encapsulation of MS2 viral capsids [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(17): 7047-7057